

DOI: <https://doi.org/10.15407/rpra28.03.234>
УДК 537.87:621.31

В.В. Овсяніков¹, **М.М. Горобець**², **В.В. Герасимов**¹

¹ Дніпровський національний університет імені Олеся Гончара
просп. Гагаріна, 72, м. Дніпро, 49010, Україна
E-mail: gerasimov@dnua.dp.ua

² Харківський національний університет імені В.Н. Каразіна
майдан Свободи, 4, м. Харків, 61022, Україна
E-mail: nikolay.n.gorobets@karazin.ua

ДОСЛІДЖЕННЯ ТОЧНОСТІ ВИЗНАЧЕННЯ ЯКОСТІ РЕЧОВИН РАДІОХВИЛЬОВИМИ МЕТОДАМИ

Предмет і мета роботи. У роботі за допомогою радіохвильових методів досліджується точність визначення якості речовин, які мають діелектричні властивості, в діапазоні надвисоких частот. Мета роботи — визначення загальної похибки вимірювань якості речовини радіохвильовим методом з урахуванням її складових частин.

Методи і методологія. Для оцінки точності визначення якості речовин застосовано метод статистичного аналізу з використанням понять середньостатистичного відхилення і дисперсії.

Результати. Досліджено переваги і недоліки хвилевідного методу при розміщенні зразка речовини всередині металевого хвилеводу. Недоліком цього методу є складність автоматизації процесу визначення якості речовини. При дистанційному методі визначення якості досліджувана речовина розташована у вільному просторі (наприклад, на конвеєрі) і опромінюється передавальною НВЧ-антенною. Приймальна антена знаходиться по інший бік від досліджуваного зразка і надсилає прийнятий сигнал до апаратури визначення якості речовини. Там вимірюється коефіцієнт згасання електромагнітної хвилі, яка пройшла крізь досліджувану речовину. Результати вимірювань виявили кореляційну залежність коефіцієнта згасання хвилі від якості речовини, що дозволяє використовувати її частотні залежності для визначення невідомої якості речовини. При дистанційному методі автоматизація визначення якості речовин, які мають діелектричні властивості, можлива. Для вказаних вище методів розраховані значення випадкових помилок визначення якості речовин методом статистичного аналізу.

Висновки. У результаті аналізу помилок визначення якості речовин одержані значення сумарних помилок у межах 7.28...12.74 % при відповідних значеннях складових помилок сучасних вимірювальних НВЧ-приладів, помилок застосування методу і типу структурної моделі визначення параметрів якості, а також помилок при обчисленні даних.

Ключові слова: точність визначення якості речовин, статистичний аналіз помилок, радіохвильовий метод, електромагнітна хвиля, відбиття і згасання хвилі в речовині.

Вступ

На цей час безліч матеріалів, побутових і промислових технічних виробів, використовуваних на практиці, виготовляються з діелектриків. За-

гальною особливістю діелектриків є те, що для електромагнітних хвиль різних частотних діапазонів вони являють собою прозорі й напівпрозорі середовища [1, 2]. Отже, зміну амплітудних,

Цитування: Овсяніков В.В., Горобець М.М., Герасимов В.В. Дослідження точності визначення якості речовин радіохвильовими методами. *Радіофізика і радіоастрономія*. 2023. Т. 28. № 2. С. 234—242. <https://doi.org/10.15407/rpra28.03.234>
Citation: Ovsyanikov, V.V., Gorobets, M.M., Gerasimov, V.V., 2023. A study of material recognition accuracy by radio wave methods. *Radio phys. radio astron.*, **28**(2), pp. 234—242. <https://doi.org/10.15407/rpra28.03.234>

© Видавець ВД «Академперіодика» НАН України, 2023. Статтю опубліковано відповідно до умов відкритого доступу за ліцензією CC BY-NC-ND (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>)

© Publisher PH "Akadempriodyka" of the NAS of Ukraine, 2023. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>)

фазових і поляризаційних характеристик електромагнітної хвилі при відбитті та/або проходженні її через діелектричне середовище можна використовувати для вимірювання комплексної діелектричної проникності (КДП) діелектриків. З іншого боку, КДП дозволяє судити про будову діелектрика, наявність і кількість домішок тощо.

Сучасні технології промислового виробництва, які засновані на застосуванні комп'ютерної техніки й роботизації, вимагають для забезпечення необхідної якості продукції реалізувати контроль виробництва безперервно, дистанційно, у режимі поточного часу [3, 4]. До того ж часто потрібний безперервний запис перебігу технологічного процесу й архівування даних. Отже, актуальним є розроблення таких радіохвильових та інших методів і засобів вимірювання й контролю якості матеріалів і виробів, які задовольняють цим досить жорстким і суперечливим вимогам (природно, не на шкоду точності визначення необхідних параметрів). Також актуальним завданням сучасної науки й технологій є неруйнівне визначення параметрів якості промислової продукції, яке успішно може бути вирішене радіохвильовим методом вільного простору, частково заповненого досліджуванним діелектриком [4].

Багаторічний закордонний і вітчизняний досвід, а також досвід авторів щодо вимірювань якості енергетичного вугілля, будівельних матеріалів, нафти та ін. показав, що радіохвильові методи мають добрі метрологічні характеристики, порівняно легко реалізуються сучасними приладами і забезпечують достатню для практики точність у високочастотному й надвисокочастотному діапазонах [1–3]. Для кількісної оцінки якості використовується показник якості речовини (ПЯР), який визначається через так званий інформативний параметр [4]. Інформативний параметр i , отже, ПЯР визначаються по-різному для різних речовин і різних технологічних процесів [1–10]. Для діелектричних матеріалів основним інформативним параметром є діелектрична проникність ϵ' і тангенс кута діелектричних втрат $\operatorname{tg} \delta$ [1, 2], що не виключає й інші можливі параметри, наприклад, вологість, питому густину, твердість, наявність і кількість домішок [1–10]. Зокрема, в якості ПЯР для вугілля, яке використовується для енергетичних потреб, можуть слугувати його питома теплота згорян-

ня, зольність (тобто відношення загальної маси шлаків до маси аналізованого зразка речовини), вологість. Для багатокомпонентних сумішей і розчинів (нафти, будівельних матеріалів, пластмас, харчових продуктів та інших діелектриків) у якості ПЯР можна застосовувати такі параметри, як питома частка домішок і особливо вологість [1–10]. При цьому для забезпечення неруйнівного безконтактного дистанційного контролю якості діелектриків у реальному масштабі часу в [6, 7] запропоновано використовувати набори еталонних аналітичних зразків контрольованих діелектриків, електрофізичні параметри й характеристики яких визначені аналітичними методами з максимально досяжною точністю, і які використовуються в якості еталонних зразків для порівняння з даними поточних вимірювань та їх калібрування. Найбільш точне значення інформативного параметра якості речовини визначають зазвичай прямими методами. Наприклад, вологість речовини — шляхом зважування зразка до і після перебування у сушильній камері, калорійність або питому теплоту згорання горючих речовин — за допомогою так званої «калориметричної бомби (камери)», а їх зольність — шляхом спалювання і зважування зразка речовини. Однак ці методи забирають багато часу для визначення ПЯР і важко піддаються автоматизації. Відомі також непрямі методи контролю якості речовин: інфрачервоні, нейтронні, теплові, радіаційні, електричні, радіохвильові та інші [1–4].

Добре відомо, що у діапазоні надвисоких частот (НВЧ) порівняно простими методами й технічними засобами можна виміряти діелектричну проникність і тангенс кута діелектричних втрат різних зразків діелектриків без впливу на них механічним шляхом або хімічними реактивами [1, 2]. Ця обставина дозволяє широко використовувати радіохвильові методи НВЧ для вимірювання й контролю параметрів і характеристик діелектричних середовищ та сумішей у технологічних процесах виробництва матеріалів і технічних виробів [3, 4]. На теперішній час можливості використання радіохвильових методів для вимірювання КДП діелектриків у діапазоні НВЧ досить добре вивчені. З порівняльного аналізу хвилевідного й резонаторного методу, з одного боку, і методу вільного простору, з іншого боку, а також з опису структурно-функціональних схем

[3, 4] впливає, що автоматизовані вимірювання ПЯР у реальному часі найпростіше реалізуються радіохвильовим методом вільного простору, частково заповненого діелектриком. Однак дотепер не досліджено, з якими недоліками пов'язана реалізація автоматизації вимірювань ПЯР методом вільного простору. З аналізу хвильових явищ відбиття, поглинання, дифракції, розсіяння та деполяризації електромагнітних хвиль у приладах для визначення ПЯР на основі радіохвильових методів впливає, що саме метод вільного простору призводить до найбільших похибок вимірювань як за рахунок збільшення випадкових похибок, обумовлених збільшенням електричних об'ємів робочої області приладу, так і за рахунок збільшення впливу неінформативних явищ дифракції, розсіяння та деполяризації електромагнітних хвиль на досліджуваних зразках діелектрика та елементах вимірювального приладу.

Метою статті є порівняльний статистичний аналіз випадкових помилок при вимірюваннях показників якості діелектриків радіохвильовими методами в діапазоні надвисоких частот.

1. Пристрій для контролю радіохвильовими методами якості речовин, які мають діелектричні властивості

На рис. 1 наведено структурно-функціональну схему пристрою для визначення параметрів якості речовини радіохвильовими методами на рівні програмного забезпечення.

Як показано на рис. 1, з вимірювальних приладів 1 на аналого-цифровий перетворювач (АЦП) надходить аналогова інформація в заданому частотному діапазоні щодо значень електрофізичних (ϵ' та $\text{tg } \delta$) або радіотехнічних (амплітуда та фаза коефіцієнта відбиття) параметрів досліджуваної речовини. Інформативними параметрами для визначення ПЯР можуть бути в даному випадку коефіцієнт стоячої хвилі за напругою (КСХН) [3–6] та коефіцієнт згасання T електромагнітної хвилі при проходженні її крізь діелектрик [3, 4, 7]. Слід мати на увазі, що останній варіант кращий, оскільки дозволяє замінити складні вимірювання фази електромагнітної хвилі простішими прямими амплітудними.

Ці дані оцифровуються в АЦП до події переповнення його таймерів (2–4), і отримані дані зберігаються у внутрішній пам'яті мікроконвертора АЦП до тих пір, поки не буде досягнуто необхідну кількість відліків цієї інформації. Після цього дані у вигляді пакета передаються по каналу послідовної передачі даних 5 типу RS до комп'ютера (програмно-обчислювального комплексу — ПОК), а АЦП починає новий цикл зняття і перетворення в цифровий код нових даних приладу 1 з початку нового циклу. Комп'ютер підхоплює ці дані з потоку СОМ-порту 6 і передає їх до процесора 7 для обробки, звідки вони передаються в потік візуалізації для відображення на екрані 8 комп'ютера.

Важливе значення у дослідженні якості речовин радіохвильовим методом має вимірювальний прилад 1. Експерименти показали, що можливо використовувати такі прилади як панорамні вимірювачі КСХН і ослаблення типів P1, P2, P2M або векторний вимірювач Spectrum Analyzer R&S FSH (Німеччина) та інші. Ці прилади дозволяють вимірювати КСХН і фазу коефіцієнта відбиття з похибками не більше $\pm(7...10)\%$.

Програмне забезпечення пристрою (рис. 1) складається з двох частин: програмне забезпечення АЦП і програмне забезпечення ПОК. За необхідності можна зберегти дані на носії інформації 9. Програмне забезпечення ПОК зосереджене не тільки на виконанні загальних функцій обробки і передачі даних, а й на вирішенні головного завдання — визначенні параметра якості досліджуваної речовини з максимально можливою точністю і достовірністю з урахуванням значень електричних параметрів цієї речовини, одержаних від приладів 1 пристрою (рис. 1).

Як приклад розглянемо вибір АЦП (2–4, рис. 1) за умови, що на його вхід від приладу 1 надходить інформаційний аналоговий сигнал з амплітудою 2.0...2.5 В з максимальною частотою спектра 5 кГц і коефіцієнтом амплітуди (підфактором) приблизно 10 дБ. Цей АЦП має забезпечити відношення сигнал/шум квантування не нижче 65 дБ. Наведеним вище вихідним даним відповідає, зокрема, 12-розрядний конвертор — АЦП типу ADUC831, розроблений науково-виробничою фірмою VD MAIS. Цей АЦП має таймер і програмно налаштовується так, щоб генерувати потворний старт механізму перетворень сигналів.

2. Способи визначення якості речовин радіохвильовим методом

Розглянемо способи визначення якості речовин радіохвильовим методом за допомогою пристрою, структурно-функціональна схема якого наведена на рис. 1. Удосконалений хвилевідний спосіб [12] передбачає застосування стандартного порожнього металевого хвилеводу, короткозамкненого з одного кінця і відкритого з іншого, всередині якого розміщується зразок досліджуваної речовини. До відкритого кінця хвилеводу підключаються НВЧ-генератор і вимірювальний прилад 1 (рис. 1). Недоліком такого способу є складність автоматизації процесу визначення вихідних інформативних параметрів речовин, а отже їх якості, особливо в розширеному від 1 до 60 ГГц частотному НВЧ-діапазоні.

Відповідно до другого способу визначення якості, досліджувана речовина розміщується у вільному просторі і опромінюється передавально-приймальною НВЧ-антенною зі складу вимірювального приладу 1, та приймає відбиту від речовини хвилю, визначаючи при цьому коефіцієнти відбиття R і КСХН радіолінії [7]. Розміри розкриву вимірювальних антен і їх взаємне розташування вибиралися таким чином, щоб відстань від антени до досліджуваного діелектрика, розташованого на конвеєрі, була не менша половини відстані дальньої зони випромінювальної антени $R_{\text{вим}} \geq L^2/\lambda$, де L — найбільший розмір розкриву антени. У роботі [14] показано, що характеристики електромагнітної хвилі на цій відстані практично не відрізняються від тих же характеристик випромінювання в дальній зоні. Робоча область пристрою має визначитися шириною діаграми направленості антен, що використовуються, по половині потужності так, щоб досліджувані матеріали, які розміщені на конвеєрі, потрапляли в цю область. Це дозволить зменшити вплив елементів конвеєра та предметів, що його оточують, на точність результатів вимірювань. З аналізу принципів роботи пристрою та реалізації вимірювальних установок випливає, що автоматизовані установки, які реалізують радіохвильовий метод відкритого простору, дозволяють забезпечити безконтактні, дистанційні, неруйнівні, безперервні або дискретні автоматизовані вимірювання ПЯР у режимі реального часу.

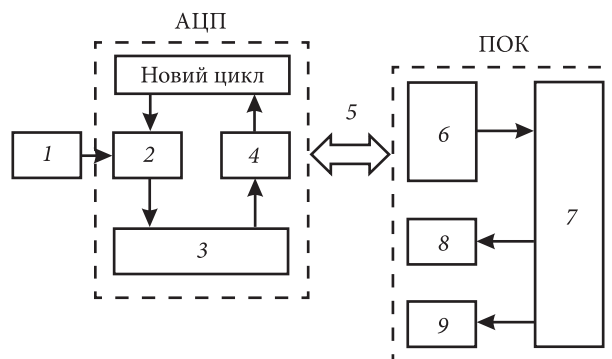


Рис. 1. Структурно-функціональна схема пристрою для визначення параметрів якості речовин на рівні програмного забезпечення: 1 — прилад для вимірювання електричних параметрів досліджуваної речовини; 2–4 — таймери АЦП; 5 — канал послідовної передачі даних (COM-порт) до ПОК (6–9)

Зазначимо, що немінучі при вимірюваннях КДП діелектрика неінформативні параметри (шорсткість відбивної поверхні, наявність навколо досліджуваного діелектрика предметів, особливо металевих, температура навколишнього середовища, запиленість робочої області приладу тощо) пов'язані з реальними умовами вимірювань і призводять до систематичних помилок. Однак у запропонованій установці, заснованій на радіохвильовому методі вільного простору, вони присутні при калібрувальних вимірюваннях КДП аналізованих зразків, стосовно яких визначається ПЯР, і можуть бути враховані на практиці.

На рис. 2 наведено приклад графіків експериментальних градуїрованих характеристик КСХН, одержаних цим способом у частотному діапазоні 2.4...4.0 ГГц для деяких значень вологості вугілля. Вимірювання проводились хвилевідним панорамним вимірювачем КСХН та згасання типу P2-53 в режимі сканування частоти. В якості зразка досліджуваного діелектрика було використано вугілля марки Г, яке характеризується теплотою згоряння 7 900...8 600 ккал/кг. Як впливає з графіків (рис. 2), спостерігається значна кореляційна частотна залежність КСХН від вологості опромінюваного вугілля, що дозволяє використовувати її для ідентифікації і визначення невідомої якості (у даному випадку — вологості, W) даної речовини.

Важливою перевагою цього способу є можливість використання НВЧ-випромінювання з малими рівнями потужності. Ця обставина важлива для забезпечення санітарних норм і вимог тех-

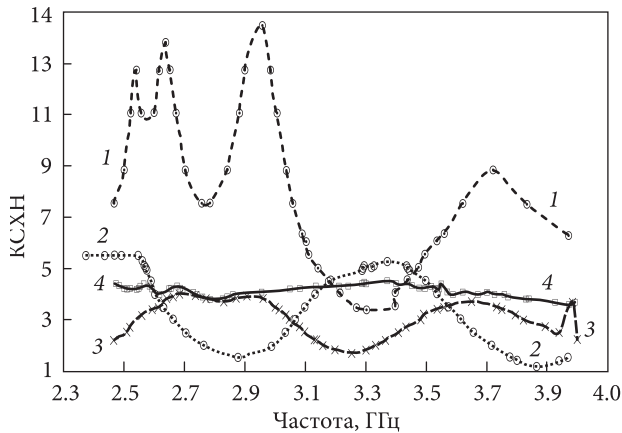


Рис. 2. Графіки залежності КСХН у частотному діапазоні сканування для деяких значень вологості W вугілля: крива 1 — 2.0 %; крива 2 — 11.7 %; крива 3 — 25.3 %; крива 4 — 36.7 %

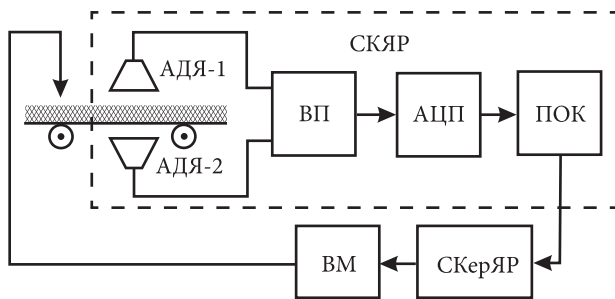


Рис. 3. Структурна схема автоматизованого пристрою для визначення якості речовин на конвеєрі з урахуванням поглинання хвилі в речовині: АДЯ-1, АДЯ-2 — антени-датчики якості речовини, встановлені поблизу конвеєра; СКЯР — система контролю якості речовини; СКерЯР — система керування якістю речовини; ПОК — програмно-обчислювальний комплекс; ВП — вимірювальний прилад; ВМ — виконавчий механізм

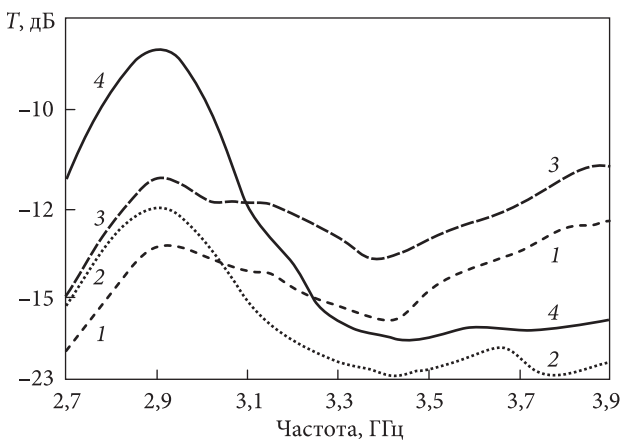


Рис. 4. Графіки дискретного набору частотних градуйованих експериментальних залежностей згасання, одержаних за допомогою пристрою (рис. 3), для деяких значень зольності A^r вугілля: крива 1 — 21.7 %; крива 2 — 24.8 %; крива 3 — 26.7 %; крива 4 — 27.5 %

ніки безпеки при роботі з НВЧ-випроміненням, а також забезпечення пожежної та вибухової безпеки під час роботи з горючими та вибухонебезпечними діелектричними речовинами. До недоліків способу, як було зазначено вище, відносяться зменшення точності вимірів інформативних параметрів і достовірності контролю якості речовини внаслідок впливу неінформативних параметрів (температури, вологості, запиленості та захаращення робочої області та її навколишнього оточення, неоднаковість зразків речовини за розмірами на конвеєрі, дифракція падаючої хвилі тощо) вимірювального пристрою.

Відповідно до третього способу визначення ПЯР [7–8], на відміну від попереднього, вимірюється коефіцієнт згасання T при проходженні хвилі крізь досліджувану речовину, як показано на рис. 3.

Як випливає з графіків (рис. 4), одержаних на пристрої (рис. 3), існує кореляційна залежність згасання $|T|$ від вологості і, отже, від зольності A^r вугілля, що дозволяє використовувати ці частотні залежності для визначення невідомої якісної характеристики речовини.

Слід мати на увазі, що сказане справедливе не тільки відносно вугілля, але і для будь-якого багатоконпонентного діелектрика.

3. Визначення якості речовин радіохвильовим методом із використанням калібрувальних значень $T_{K_i}(f_j, K_i)$ ослаблення електромагнітної хвилі в досліджуваній речовині

Для максимального використання можливості швидкої комп'ютерної обробки інформації доцільно використовувати вимірювання інформативних параметрів не на одній частоті, а в декількі достатньо широкій смузі частот робочого діапазону. Технічно це легко досягається шляхом використання вимірювачів КСХН та згасання в режимі свіпіння частоти. При цьому параметри і характеристики еталонних зразків мають визначатися на тій же установці, бажано в тій самій смузі частот.

Після одержання на обладнанні (рис. 3) калібрувальних значень ослаблення електромагнітної хвилі — створеного заздалегідь (рис. 4)

масиву $T_{K_i}(f_j, K_i)$, де f_j — номер частоти у дискретному діапазоні дослідження речовини, K_i — номер речовини у калібрувальній базі даних, — і вимірювання значення згасання хвилі $T_H(f_j)$ у речовині з невідомою якістю виконується процедура порівняння обох вказаних значень $T_{K_i}(f_j, K_i)$ і $T_H(f_j)$ в заданому частотному діапазоні. За результатами порівняння визначається

параметр якості невідомої речовини з урахуванням калібрувальної бази даних [7, 8, 13].

4. Аналіз похибок визначення якості речовин радіохвильовими методами

Загальна помилка визначення якості речовин радіохвильовим методом складається в основному

Результати оцінки загальної помилки визначення ПЯР та її складових частин у НВЧ-діапазоні хвилевідним і дистанційним методами з використанням приладів P1, P2, P2M, ВПО-4 «R&S»

№ з/п	Помилки	Методи визначення ПЯР		
		Хвилевідний	Метод вільного простору (дистанційний)	
			у лабораторії	на конвеєрі
1	Помилки вимірювальних приладів за даними технічних паспортів $\Delta_{1\text{прил}}$, %	— 10 (P2, P2M) 7 (P1, ВПО-4 «R&S»)	12 (P1) 10 (P2, P2M) 7 (ВПО-4 «R&S»)	12 (P1) 12 (P2, P2M) 7 (ВПО-4 «R&S»)
2	Помилка приладу $\Delta_{1\text{прил}}$	— 0.10 0.07	0.12 0.10 0.07	0.12 0.10 0.07
3	Середньоквадратичне відхилення $\text{СКВ}_1 = \Delta_{1\text{прил}} / 2.6$	— 0.038 0.027	0.046 0.038 0.027	0.046 0.038 0.027
4	Дисперсія $D_1 = \text{СКВ}_1^2$	— 0.0014 0.00073	0.0021 0.0014 0.00073	0.0021 0.0014 0.00073
5	Помилка, яка пов'язана з застосуванням методу і типу структурної моделі визначення ПЯР, $\Delta_{2\text{вик}}$	— 0.02 0.01	0.03 0.03 0.02	0.04 0.04 0.03
6	Середньоквадратичне відхилення $\text{СКВ}_2 = \Delta_{2\text{вик}} / 2.6$	— 0.007 0.0038	0.0012 0.0012 0.0077	0.015 0.015 0.012
7	Дисперсія $D_2 = \text{СКВ}_2^2$	— 0.00006 0.000014	0.000014 0.000014 0.00006	0.00023 0.00023 0.00014
8	Помилки при обчисленні з урахуванням електричних параметрів речовин, $\Delta_{3\text{чис}}$	0.02	0.02	0.02
9	Середньоквадратичне відхилення $\text{СКВ}_3 = \Delta_{3\text{чис}} / 2.6$	0.0077	0.0077	0.0077
10	Дисперсія $D_1 = \text{СКВ}_3^2$	0.00006	0.00006	0.00006
11	Сума дисперсій $\Sigma (D_1 + D_2 + D_3)$	— 0.00152 0.00080	0.0023 0.0016 0.00085	0.0024 0.0017 0.00093
12	$\text{СКВ}_{\text{сум}} = \sqrt{D_1 + D_2 + D_3}$	— 0.039 0.028	0.048 0.040 0.029	0.049 0.041 0.030
13	$\Delta_{\text{сум}} = \sqrt{D_1 + D_2 + D_3} \times 2.6$	— 0.1014 0.0728	0.1248 0.1040 0.754	0.1274 0.1006 0.0780
14	$\Delta_{\text{сум}}$, %	— 10.14 7.28	12.48 10.40 7.54	12.74 10.06 7.80

з трьох частин: 1) помилки $\Delta_{1\text{прил}}$ при визначенні радіотехнічних параметрів, тобто початкової електричної характеристики речовини, вимірювальною апаратурою 1 (рис. 1) або вимірювальним приладом (рис. 3); 2) помилки $\Delta_{2\text{вик}}$, пов'язані з використанням математичного методу і типу структурної моделі визначення ПЯР (хвилевідної або у вільному просторі); 3) помилки чисельної обробки даних $\Delta_{3\text{чис}}$ одержаних електрофізичних параметрів речовини.

Для оцінки точності визначення якості речовин застосовуємо метод статистичного аналізу з використанням понять середньостатистичного відхилення і дисперсії [15], які використовувалися для одержання як загальної помилки при визначенні якості речовин, так і її складових частин (таблиця). У цій таблиці показано результати загальної оцінки помилки визначення ПЯР та трьох вказаних вище її складових частин з урахуванням даних, наведених у роботах [11–13, 16, 17].

У наведеній вище таблиці надані загальні результати похибки визначення ПЯР та трьох вказаних вище його складових частин з урахуванням даних робіт [11–13, 16, 17]. У п. 1 таблиці наведені похибки вимірювальних приладів, які зазначені у заводських технічних паспортах або в паспортах метрологічної атестації приладів. У першому рядку зазначено похибку приладу типу P1, у другому – типів P2, P2M, у третьому – ВПО-4 «R&S». Таким же чином наведені складові похибки кожного методу в пп. №№ 2–7, 11–14 таблиці.

Як видно з наведених результатів розрахунків, на загальну (сумарну) похибку кожного методу найбільше впливають похибки вимірювальних приладів. Похибки, що обумовлені особливостями математичної моделі методу та похибками при обчисленні даних, значно менші.

З таблиці видно, що значення сумарних помилок ($\Delta_{\text{сум}}$, п. 14 таблиці) становлять 7.28...12.74 % при відповідних значеннях складових помилок сучасних вимірювальних НВЧ-приладів ($\Delta_{1\text{прил}}$, п. 1 таблиці) у межах 7.0...12.0 %, помилок застосування методу і типу структурної моделі визначення параметрів якості речовин ($\Delta_{2\text{вик}}$, п. 5 таблиці) у межах 2.0...4.0 % і помилок при обчисленні даних з урахуванням раніше виміряних електрофізичних параметрів досліджуваних речовин ($\Delta_{3\text{чис}}$, п. 8) в 2.0 %. Таким чином, для зни-

ження загальної помилки визначення якості речовин $\Delta_{\text{сум}}$ радіохвильовим методом необхідно застосовувати вимірювальні прилади з найменш можливою помилкою вимірювання електричних параметрів досліджуваних речовин $\Delta_{1\text{прил}}$ у заданому робочому частотному діапазоні.

Для зниження помилки $\Delta_{2\text{вик}}$, яка на практиці може бути і більшою, ніж вказано в таблиці, необхідно вдосконалити установку (рис. 3) в її робочій області та поблизу вимірювального обладнання, особливо при дистанційному методі досліджень, і водночас зменшити вплив сторонніх предметів поблизу досліджуваної речовини (дротів від вимірювального приладу, конвеєрної стрічки та обладнання для його експлуатації, тощо).

Для зниження помилки $\Delta_{3\text{чис}}$, яка на практиці також може бути більшою, ніж вказано в таблиці, необхідно щоб АЦП пристрою (рис. 1, 3) забезпечував мінімальну відстань між часовими інтервалами та максимально можливе число рівнів квантування.

Зауважимо, що зменшити похибки результатів вимірювань ПЯР радіохвильовими методами (рис. 1, 3) за рахунок систематичних помилок вимірювань можливо шляхом використання якомога більшої кількості еталонних зразків досліджуваних діелектриків, параметри і характеристики яких визначені в діапазоні частот, у калібрувальній базі даних.

Висновки

Розроблено структурно-функціональні схеми пристроїв для кількісного визначення параметрів якості речовин, які мають характерні властивості діелектриків, радіохвильовими методами. Показано, що у випадках, коли вимірювати і контролювати якість досліджуваної речовини можна дискретно з не надто малим часовим інтервалом вимірювань, доцільно використовувати хвилевідний або резонаторний радіохвильові методи, оскільки вони забезпечують високу точність вимірювань, порівняно просто реалізуються за допомогою радіовимірювальних приладів, зокрема панорамних вимірювачів КСХН і згасання з частотним скануванням, мають добрі метрологічні характеристики. До принципів недоліків цих методів відноситься необхідність попередньої

підготовки зразків діелектриків для вимірювань. Автоматизувати контроль якості діелектриків цими методами досить важко. Якщо ж якість діелектрика необхідно вимірювати і контролювати безперервно (наприклад, вологість і калорійність енергетичного вугілля у виробництві електроенергії тепловими електростанціями, питому долю домішок у харчовій і хімічній промисловості, наявність домішок нафти тощо), здійснювати безконтактний неруйнівний контроль і вимірювання якості речовини у режимі реального часу

можливо виключно радіохвильовим методом вільного простору, частково заповненого досліджуваним діелектриком. При цьому досить просто технічно забезпечити автоматизацію контролю та архівування інформації.

Автори висловлюють подяку доценту Дніпровського національного університету імені Олеся Гончара С.В. Бухарову і завідувачці лабораторії О.Р. Безносовій за плідну співпрацю за темою статті.

БІБЛІОГРАФІЧНИЙ СПИСОК

1. Брандт А.А. *Исследование диэлектриков на СВЧ*. Москва: Физматгизд, 1964. 404 с.
2. Харвей А.Ф. *Техника сверхвысоких частот*. Пер. с англ. под ред. В.И. Сушкевича. Т.1. Москва: Сов. радио, 1965. 783 с.
3. Кричевский Э.С., Волченко А.Г., Галушкин С.С. *Контроль влажности твёрдых и сыпучих материалов*. Москва: Энергоатомиздат, 1987. 136 с.
4. Викторов В.А., Лункин Б.В., Совлуков А.С. *Радиоволновые измерения параметров технологических процессов*. Москва: Энергоатомиздат, 1989. 208 с.
5. Вичкань А.В., Мельяновский П.А. Измерение комплексной диэлектрической проницаемости водных растворов в высокочастотном диапазоне. *Радиофизика и электрон.*: сб. науч. тр. Ин-т радиофизики и электрон. НАН Украины. Харьков, 2002. Т. 7, № 1. С. 154—157.
6. Ovsyanikov V.V. Measurements of the complex permittivity by the waveguide and resonant cavity methods. *Proc. Int. Conf. on Actual Problems of Measuring Technique*. (Kyiv, Ukraine, 7—10 Sept. 1998). Kyiv, Ukraine, 1998. P. 224—225.
7. *Спосіб експрес-контролю якісних характеристик речовин у НВЧ діапазоні*: пат. 71301А, Україна: МПК 7G01N 22/00 / В.В. Овсяніков, С.В. Бухаров, Вол.В. Овсяніков. Опубл. 15.11.2004. Бюл. № 11.
8. *Спосіб автоматизованого контролю якісних характеристик речовин у мікрохвильовому діапазоні та пристрій для його реалізації*: пат. 90540, Україна: МПК G01N 22/00 / Г.В. Кузнецов, С.І. Випанасенко, В.В. Овсяніков, С.М. Вовк, О.Ю. Гусев, Вол.В. Овсяніков, Г.І. Фесак, С.В. Мартиненко. № а200805021; заявл. 18.04.2008, опубл. 11.05.2008. Бюл. №9. 6 с.
9. Овсяніков Вол.В. Експрес-контроль якості вугілля радіометричним методом. *Вісник НТУУ «КПІ». Сер. «Радіотехніка. Радіоапаратобудування»*. 2010. Вип. 43. С. 24—32.
10. Бухаров С.В., Овсяніков Вл.В. Диагностика параметров качества угля и жидких нефтепродуктов электромагнитными методами. *Вісник НТУУ «КПІ». Сер. «Радіотехніка. Радіоапаратобудування»*. 2011. Вип. 45. С. 120—129.
11. Ovsyanikov V.V. Statistical analysis of internal parameters of radiating systems. *Proc. 9th Int. Conf. Math. Methods in Electromagn. Theory*. (Kyiv, Ukraine, 10—13 Sept. 2002).
12. Овсяніков В.В., Горобець М.М., Безносова О.Р. Контроль якості речовин електромагнітним зондуванням у хвилеводі. *Вісник Харківськ. нац. ун-ту імені В.Н. Каразіна. Сер. «Радиофизика и электроника»*. 2020. Вип. 32. С. 61—70.
13. Овсяніков В.В., Безносова О.Р. Дослідження можливості визначення якості речовин дистанційним радіохвильовим методом на прикладі будівельної цегли. *Радиофизика и радиоастрономия*. 2022. Т. 22, № 2. С. 65—72.
14. Горобець Н.Н., Овсянікова Е.Е. Волновые процессы в прожекторном луче апертурных антенн. *Прикладная радиоэлектроника*. 2015. Т. 14, № 1. С. 51—58.
15. Шифрин Я.С. *Вопросы статистической теории антенн*. Москва: Сов. радио, 1970. 384 с.
16. Сыпчук П.П., Талалай А.М. *Методы статистического анализа при управлении качеством изготовления элементов РЭА*. Москва: Сов. радио, 1979. 168 с.
17. Шифрин Я.С. Статистическая теория антенн. *Справочник по антенной технике*: в 5 т. Т. 1. Москва: Радиотехника, 1997. Гл. 9. С. 148—205.

Стаття надійшла 21.09.2022

REFERENCES

1. Brandt, A.A., 1964. *Research of dielectrics at microwave frequency*. Moscow, USSR: Fizmatizd Publ. (in Russian).
2. Harvey, A.F., 1965. *Microwave technology*. Transl. from English by V.I. Sushkevich. Vol. 1. Moscow, USSR: Sov. Radio Publ. (in Russian).
3. Krichevsky, E.S., Volchenko, A.G., Galushkin, S.S., 1987. *Moisture control of solid and bulk materials*. Moscow, USSR: Energoatomizdat. Publ. (in Russian).
4. Viktorov, V.A., Lunkin, B.V., Sovlukov, A.S., 1989. *Radio wave measurements of technological process parameters*. Moscow, USSR: Energoatomizdat. Publ. (in Russian).

5. Vichkan', A.V., Melyanovsky P.A., 2002. Measurement of Complex Dielectric Permittivity of Water Solutions in High-Frequency Band. In: V.M. Yakovenko, ed. 2002. *Radiofizika i elektronika*. Kharkov: IRE NAS of Ukraine Publ. 7(1), pp. 154–157 (in Russian).
6. Ovsyanikov, V.V., 1998. Measurements of the complex permittivity by the waveguide and resonant cavity methods. In: *Proc. Int. Conf. on Actual Problems of Measuring Technique*. Kyiv, Ukraine, 7–10 Sept. 1998.
7. Ovsyanikov, V.V., Bukharov, S.V., Ovsyanikov, Vol.V., 2004. *Method of express control of quality characteristics of substances in microwave range*. Ukraine. Pat. 71301 (in Ukrainian).
8. Kuznetsov, G.V., Vypanasenko, S.I., Ovsianikov, V.V., Vovk, S.M., Gusiev O.Yu., Ovsianikov, Vol.V., Fesak, H.I., Martynenko, S.V., 2010. *Method for automated control of qualitative characteristics of substances in micro-wave range and device for its realization*. Ukraine. Pat. 90540 (in Ukrainian).
9. Ovsyanikov, Vol.B., 2010. Express-control of the brightness of the wool by the radiometric method. *Bull. NTUU "KPI". Ser. "Radio Engineering. Radio Instrument Making"*, 43, pp. 24–32 (in Ukrainian).
10. Bukharov, S.V., Ovsyanikov, V.V., 2011. Diagnostics of quality parameters of coal and liquid oil products by electromagnetic methods. *Bull. NTUU "KPI". Ser. "Radio Engineering. Radio Instrument Making"*, 45, pp. 120–129 (in Russian).
11. Ovsyanikov, V.V., 2002. Statistical analysis of internal parameters of radiating systems. In: *Proc. of 9th Int. Conf. on Math. Methods in Electromagn. Theory*. Kyiv, Ukraine, 10–13 Sept. 2002.
12. Ovsyanikov, V.V., Gorobets, M.M., Beznosova, O.R., 2020. Quality control of substances by electromagnetic sensing in a waveguide. *Visnyk of V.N. Karazin Kharkiv National University. Ser. "Radiophysics and Electronics"*, 32, pp. 61–70 (in Ukrainian).
13. Ovsyanikov, V.V., Beznosova, O.R., 2022. Determination of the ability to determine the quality of speech by a remote radio-frequency method on the butt of a wake-up cell. *Radio phys. radio astron.*, 22(2), pp. 65–72 (in Russian).
14. Gorobets, N.N., Ovsyanikova, E.E., 2015. Wave processes in the searchlight beam of aperture antennas. *Appl. Radioelectron.*, 14(1), pp. 51–58 (in Russian).
15. Shifrin, Ya.S., 1970. *Questions of the Statistical Theory of Antennas*. Moscow, USSR: Sov. Radio Publ. (in Russian).
16. Sypchuk, P.P., Talalay, A.M., 1979. *Methods of statistical analysis in quality control of manufacturing elements of REA*. Moscow, USSR: Sov. Radio Publ. (in Russian).
17. Shifrin, Ya.S., 1997. *The Statistical Theory of Antennas*. In: *Handbook on Antenna*. Moscow: Radiotekhnika Publ., 1, pp. 148–205 (in Russian).

Received 21.09.2022

V.V. Ovsyanikov¹, M.M. Gorobets², V.V. Gerasimov¹

¹ Oles Honchar Dnipro National University
72, Gagarin Ave., Dnipro, 49010, Ukraine

² V.N. Karazin Kharkiv National University
4, Svobody Sq., Kharkiv, 61022, Ukraine

A STUDY OF MATERIAL RECOGNITION ACCURACY BY RADIO WAVE METHODS

Subject and Purpose. Accuracy of the material recognition using radio wave methods in the ultra-high frequency band for substances with dielectric properties is the present paper concern. To estimate a total error arising in material measurements by the radio wave method and determine constituents of the error is the aim of the work.

Methods and Methodology. The material recognition accuracy is estimated by the method of statistical analysis in terms of average statistical deviation and dispersion.

Results. Advantages and disadvantages of the waveguide method in which a test material sample is placed inside a metal waveguide have been traced, suggesting an obvious drawback that the material recognition process of the sort is difficult to be automated. In the remote inspection procedure, the test material is in free space (e.g. on a conveyor) where it is illuminated with a microwave transmitting antenna. The receiving antenna is located on the other side of the test sample and transfers the received signal to the apparatus for determining material parameters. There, the attenuation coefficient is measured as the electromagnetic wave passes through the sample. The measurement results show a correlation dependence of the wave attenuation coefficient on the quality of the substance, enabling us to use frequency dependences of the material to reveal its unknown quality. The remote method makes it possible to automate the recognition of materials with dielectric properties. For these methods mentioned right above, random error values arising during the material recognition were estimated by the method of statistical analysis.

Conclusions. The analysis of errors in the material recognition shows that the total error ranges from 7.28 to 12.74% with corresponding constituent errors including faults of today's microwave measuring devices, inappropriate application of the method or unsuitable type of the structural model of the parameter determination, and errors in data calculations.

Keywords: material recognition accuracy, statistical analysis of errors, radio wave method, electromagnetic wave, wave reflection from and attenuation in a material.